

中华人民共和国第一机械工业部统编

机械工人技术培训教材

化铁工艺学

科学普及出版社

中华人民共和国第一机械工业部统编

机械工人技术培训教材

化铁工艺学

6703/17

科学普及出版社



B: 005799

本书是第一机械工业部统编的机械工人技术培训教材，它是根据一机部《工人技术等级标准》和教学大纲编写的。本书除介绍金属学、造型、浇注基础知识外，主要系统讲述铸铁、炉料、熔炼设备、修炉筑炉、冲天炉熔炼、工频电炉熔炼、冲天炉测试等，内容以工艺技术为主。

本书作为化铁工技术培训教材（初、中级合用），也可供有关技术人员和工人参考。本书由杨堂德、成廷森同志编写，张德纯、梁俊忠、吴蜀龙同志审稿。

中华人民共和国第一机械工业部统编
机械工人技术培训教材
化 铁 工 艺 学
责任编辑：郭蕴玉

科学普及出版社出版（北京白石桥紫竹院公园内）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
固安县印刷厂印刷

开本：787×1092毫米^{1/16} 印张：19^{1/2} 字数：467 千字
1982年11月第1版 1982年11月第1次印刷
印数：1—38,000册 定价：1.80元
统一书号：15051·1050 本社书号：0536

对广大工人进行比较系统的技术培训教育，是智力开发方面的一件大事，是一项战略性的任务。有计划地展开这项工作，教材是个关键。有了教材才能统一培训目标，统一教学内容，才能逐步建立起比较正规的工人技术教育制度。

教材既是关键，编写教材就是一件功德无量的事。在教材行将出版之际，谨向为编写这套教材付出辛勤劳动的同志们致以敬意！

第一机械工业部第一副部长

杨 铎

一九八二年元月

前 言

为了更好地落实中共中央、国务院《关于加强职工教育工作的决定》，对工人特别是青壮年工人进行系统的技术理论培训，以适应四化建设的需要，现确定按初级、中级、高级三个培训阶段，逐步地建立工人培训体系，使工人培训走向制度化、正规化的轨道，以期进一步改善和提高机械工人队伍的素质。为此，我们组织了四川省、江苏省、上海市机械厅(局)和第一汽车厂、太原重型机器厂、沈阳鼓风机厂、湘潭电机厂，编写了三十个通用工种的初级、中级的工人技术培训教学计划、教学大纲及其教材，作为这些工种工人技术理论培训的统一教学内容。

编写教学计划、教学大纲及其教材的依据，是一机部颁发的《工人技术等级标准》和当前机械工人队伍的构成、文化状况及培训的重点。初级技术理论以二、三级工“应知”部分为依据，是建立在初中文化基础上的。它的任务是为在职的初级工人提供必备的基础技术知识，指导他们正确地使用设备、工夹具、量具、按图纸和工艺要求进行正常生产。中级以四、五、六级工“应知”部分为依据，并开设相应的高中文化课，在学完了初级技术理论并具有一定实践经验的工人中进行。它的任务是加强基础理论教学，使学员在设备、工夹具、量具、结构原理、工艺理论、解决实际问题 and 从事技术革新的能力上有所提高（高级以七、八级工“应知”部分为依据，这次未编）。编写的教材计有：车工、铣工、刨工、磨工、齿轮工、镗工、钳工、工具钳工、修理钳工、造型工、化铁工、热处理工、锻工、模锻工、木模工、内外线电工、维修电工、电机修理工、电焊工、气焊工、起重工、煤气工、工业化学分析工、热工仪表工、锅炉工、电镀工、油漆工、冲压工、天车工、铆工等工艺学教材和热加工的六门基础理论教材：数学、化学、金属材料及其加工工艺、机械制图、机械基础、电工基础。

在编写过程中，注意了工人培训的特点，坚持了“少而精”的原则。既要理论联系生产实际，学以致用，又要有理论的高度和深度；既要少而精，又要注意知识的科学性、系统性、完整性；既要短期速成，又要循序渐进。在教学计划中对每个工种的培养目标，各门课程的授课目的，都提出了明确的要求，贯彻了以技术培训为主的原则。文化课和技术基础课的安排，从专业需要出发，适当地考虑到今后发展和提高的要求，相近工种的基础课尽量统一。

这套教材的出版，得到了有关省、市机械厅(局)、企业、学校、研究单位和科学普及出版社的大力支持，在此特致以衷心的感谢。

编写在职工人培训的统一教材，是建国三十年来第一次。由于时间仓促，加上编写经验不足，教材中还难免存在缺点和错误，我们恳切地希望同志们试行中提出批评和指正，以便进一步修改、完善。

第一机械工业部工人技术培训教材编审领导小组

一九八一年十二月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 铸造生产的特点及其在机械工业中的地位	1
第二节 我国铸造工业发展概况	1
第三节 铸造生产的发展动态	2
第二章 金属学基础	6
第一节 金属的晶体结构	6
第二节 金属的结晶	8
第三节 合金的构造	13
第四节 铁碳合金状态图	15
第三章 造型、浇注的基本知识	29
第一节 造型、制芯的基本知识	29
第二节 浇注的基本知识	42
第三节 铸件缺陷分析	49
第四章 铸铁	55
第一节 灰铸铁	55
第二节 球墨铸铁	82
第三节 可锻铸铁	109
第四节 蠕墨铸铁	118
第五节 特种铸铁	126
第五章 炉料	143
第一节 金属炉料	143
第二节 熔剂	156
第三节 燃料	159
第四节 备料与管理	166
第六章 熔炼设备	174
第一节 常用化铁炉	174
第二节 新型冲天炉	193
第三节 特种化铁炉	197
第四节 冲天炉机械化	203
第七章 修炉筑炉	215
第一节 修、筑炉材料	215
第二节 冲天炉及铁水包的修筑	220
第三节 特种化铁炉的修筑	222
第四节 修炉操作机械化	223
第八章 冲天炉熔炼	228
第一节 冲天炉熔炼的基本原理	228

第二节	冲天炉的热平衡	234
第三节	冲天炉熔炼操作工艺	238
第四节	各种冲天炉熔化的特点	242
第五节	影响冲天炉铁水温度的主要因素	245
第六节	冲天炉的熔炼控制	251
第七节	冲天炉的强化熔炼	261
第八节	铁水质量对铸件质量的影响	264
第九节	熔炼工艺规程的基本知识	268
第九章	工频电炉熔炼	272
第一节	感应电炉的工作原理及构造	272
第二节	工频感应电炉熔炼的特点及应用	281
第三节	工频感应电炉的熔炼操作工艺	282
第四节	工频电炉熔炼的质量控制	290
第十章	冲天炉的测试	292
第一节	铁水温度的测量	292
第二节	风量风压的测量	297
第三节	炉气分析	301
第四节	前炉内铁水液面的测定	302
第五节	化学成分的炉前快速分析	303
第十一章	安全技术知识	306

第一章 绪 论

第一节 铸造生产的特点及其在机械工业中的地位

铸造生产是金属加工的一种方法，用以制造机器零件的毛坯、半成品和成品。

铸造是将熔化的金属浇注入特制的铸型（铸型的型腔与所需要的毛坯件形状相同）中，冷却后从铸型中取出已凝固的铸成物，即为所需要的毛坯件。用铸造方法制造的毛坯件通称为铸件。

铸造生产在机械工业中占有很重要的地位，是机械制造业的基础之一。在一般机械中，铸件约占整个机械重量的45~90%。一辆汽车的铸件重量约占40~60%，一台拖拉机的铸件重量约占70%，一台金属切削机床的铸件重量约占70~80%，重型机械、矿山机械、水力发电设备的铸件重量约占85%以上。

随着铸造技术的不断发展，铸件的机械性能和使用性能日益提高，使铸件在国民经济各个领域的应用更加广泛，尤其是铸铁件，占了铸件全部重量的70%以上。随着铸铁材料的不断发展，铸铁的应用范围正在进一步扩大。

铸件的应用之所以如此广泛，是因为铸造与其它金属加工方法相比较，具有以下优点：

（1）能够制造各种尺寸和形状的铸件，其轮廓尺寸可小至几毫米，大至几十米；重量可小至几克，大至数百吨；

（2）铸件与设备零件的形状和尺寸可以做到最为相近，因而切削加工余量可以减到最小，这就减少了金属材料的消耗量和节省了加工工时，精密铸件甚至可以不加工而直接用于装配产品（无切削或少切削加工，提高了原材料的利用率）；

（3）可以制造因材料塑性差不宜锻压，或者不宜焊接的合金件，如铸铁件、青铜件等；

（4）铸件的成本低，生产周期短，既适于单件小批生产，又适于大量生产。

铸造生产是机械制造中的头道工序，它直接影响到整个机械产品的生产。铸件数量不足，会影响下道工序的生产，若铸件质量不能满足要求，不但浪费了铸造工时和材料，而且还浪费了机械加工工时和各种消耗，如果在铸造及加工过程中没有检查出带有缺陷的铸件而将它装入设备中，就可能造成设备发生事故的隐患。

在铸造生产中，熔炼工序是铸造生产的重要组成部分，它占有极为重要的地位。要获得高质量的铸件，首先必须要有高质量的铁水。若铁水温度过低或化学成分不合格，都可能造成铸件报废。因此熔炼工序在很大程度上决定了全部铸造工作的质量。而熔炼过程又是一个复杂的物理、化学过程，影响因素很多，因此熔炼工序在铸造生产中更具有重要的地位。

第二节 我国铸造生产发展概况

我国铸造生产有着悠久的历史 and 卓越的成就，是世界上冶铸技术的发源地。

远在3500年前的商代，冶铸技术就已相当发达，当时已能运用成熟的铸造技术来制造一些大型、精美、复杂的青铜件。如在河南安阳出土的“司母戊鼎”（礼器）大型青铜铸件，重达875公斤，带耳高1370毫米，长1100毫米，宽770毫米，鼎身上有龙纹盘绕，四周饰有蟠龙纹和饕餮纹，图案精致优美，鼎腹内铸有“司母戊”三字。到战国时期，青铜铸造已发展到能够采用不同的成分配方，制作不同的器具。

明朝永乐年间，铸造了一口高7米、直径3.7米、重42吨的大铜钟，钟的内、外铸有佛教经文，钟上字画整齐，声音宏亮。现安置在北京西郊大钟寺内。

在冶铸生铁方面，公元前513年，已有铸铁的刑鼎出现。我国出土最早的铸铁件是春秋晚期的农具铸件。值得指出的是，战国时代就已出现了可锻铸铁，比欧洲一些国家早2200年左右。灰铸铁的出现大约在西汉中期。这时，许多地区逐渐用煤代替一部分木炭来炼铁，并出现了竖炉结构，采用了多管鼓风和直径达2米的冶炼炉，进一步提高了铸铁技术。公元974年已能铸造高6.1米、长5.5米的大铁狮（河北沧县）。

我国古代的化铁炉和炼铁炉，是不可分的既可以化铁又可以炼铁的熔化、冶炼两用式鼓风熔炼炉。公元31年（东汉）杜诗创制了水力鼓风机，用来鼓风炼铁。公元215年韩暨把此法推广到整个魏国。而欧洲的水力鼓风炉则是在十二、十三世纪之间才发明的，比我国迟一千一百多年。

由于有了水力鼓风熔炼炉，使熔炼的铁水质量得到提高。到明朝时，发展更加迅速，出现了容积更大的熔铁炉，一次可熔铁1000多公斤，一天可出六炉铁。鼓风所用的大风箱须要5~6人才能拉动，这种风箱至今还有应用。

明朝崇祯年间（1611—1644年），宋应星著的“天工开物”一书，第一次比较详细地记载了我国冶铸工艺的情况，这对铸铁技术的发展起了促进作用。书中叙述当时所用的熔炉仍然是冶炼、熔化两用炉，结构和现在的勺炉、三节炉相似。这种冶炼、熔化合为一体的状况持续了1000多年，直到明朝后期才逐步分开展展。

在铸造工艺技术方面，我国更有卓绝的创造，在殷商时代就已掌握了泥型（当时称陶范）铸造工艺，这一工艺至今还广为应用。在金属型方面，我国使用也较早。1953年出土了一批战国时代的铁范（金属型）和铁的农具如铁锄、铁犁等，就足以证明。关于失蜡铸造，据考证，唐代已用此法来铸造钱币和各种艺术铸件。现在故宫和颐和园的许多精致的铸件，如铜狮、狻猊等，都是用失蜡铸造制造的。

但是，近一、二百年来，尤其是在国民党统治时期，我国的铸造生产技术却落后了。解放前，我国只有一些容量很小的勺炉、三节炉，几乎没有冲天炉，只能生产抗拉强度在18公斤力/毫米²以下的普通灰铸铁。到1949年，我国才开始生产孕育铸铁，其强度也只达20公斤力/毫米²左右。解放后，我国的铸造生产得到了迅速的发展，1950年我国开始试制球墨铸铁，并于1951年投入生产，1952年在上海诞生了我国自行设计和装备的第一个机械化铸造车间。随着我国工业、农业的飞速发展，铸造生产在工艺和设备各方面发生了根本的变化，使我国的铸造生产技术提高到了一个新的水平。

第三节 铸造生产的发展动态

当前，国内外铸造生产技术的发展趋势可概括为“精、高、新”。精，即精密化，大力发

展提高铸件精度的各种铸造工艺；高，即高效率，努力发展铸造生产过程的机械化、自动化；新，即广泛推广采用新工艺、新技术、新材料、新设备。

一、发展提高铸件精度的各种铸造工艺

提高铸件精度，可以大量节约金属，减少加工工时和设备磨损，提高劳动生产率，降低成本。随着机械工业的发展，对铸件质量的要求亦日益提高，除砂型铸造的造型、制芯工艺不断向精密化方向发展外，国内外正在努力发展高压造型、流态自硬砂造型、实型造型、冷芯盒和热芯盒射芯等，尽量提高铸件精度。

特种铸造是少、无切削工艺的重要组成部分。各种特种铸造都能提高铸件精度。因此国内外都在不断发展熔模铸造、壳型铸造、压铸、低压铸造、挤压铸造、金属型铸造、陶瓷型铸造等特种铸造工艺。

各种铸造工艺及其效果可参考下表：

铸 造 方 法	效 果	铸件尺寸公差 (毫米)
压 铸	每采用一台压铸机可节约15~16台金属切削机床	100±0.3
熔 模 铸 造	每采用一吨熔模铸件可节约700台时加工量，金属切削量由25~40%降至1~4%	100±0.3
金属型铸造	铸件成本和加工余量均降低10~20%	100±0.4
陶瓷型铸造 模具铸件	成本可降低45%	100±0.35
低 压 铸 造	可使金属利用率达到95%以上	100±0.4
壳 型 铸 造	加工余量可降低25~30%	100±0.75
高 压 造 型	加工余量可降低78.8%，金属消耗降低42%，铸件重量大小平均降低15~20%	100±0.3

二、发展生产过程的机械化、自动化

铸造生产要实现高效高速，必须努力实现铸造生产过程的机械化和自动化。

我国铸造机械是在解放后才逐渐得到发展的。1952年，上海中国纺织机械厂自行设计、制造了脱箱震压式造型机，并建成了我国第一条机械化造型线，1959年该厂又建成了我国第一条气动微震半自动造型线，1964年我国研制出高压造型机，1966年长春第一汽车制造厂建成我国第一条多触头高压造型线，大量建造生产线是在1966年以后，1971年我国开始生产垂直分型无箱射压造型机，1973年开始自制水平分型无箱射压造型线，铸造生产的机械化、自动化在解放以后的三十余年来得到了迅速的发展。

铸造生产过程机械化和自动化的发展特点是：以造型为中心，逐步实现包括砂处理、熔化、浇注、落砂、清理等全部生产过程的机械化、自动化。其效果表现在提高产量、提高劳动生产率、提高铸件质量、降低铸件成本、节约劳动力和改善劳动条件等方面。如一条自动化高压造型生产线，比单机操作的生产效率要提高几十倍；一条生产效率为300型/小时的无箱射压造型线，只需1~2人操作；冲天炉配料、加料实现机械化、自动化后，只

需一人就可顶替原来7~8人工作；随着电子技术的发展，有些国家已采用电子计算机自动控制整个铸造过程。

组织专业化大规模集中生产，是铸造生产发展的趋势。当前，世界各工业发达的国家都十分重视铸造生产的专业化，一般要求新建铸造车间的产量必须在一万吨以上，以便于实现铸造生产的机械化和自动化，达到高效优质低成本的目的。我国由于厂点分散，专业化水平低，且大部分工厂是大而全、小而全的全能厂，因而难以采用先进工艺和机械化设备，目前，铸造生产多数仍以手工操作为主，机械化程度仅占10~25%左右，所以劳动生产率很低。1977年我国一机部系统铸铁件全员劳动生产率只有7~8吨/人年，而1973年美国为78吨/人年，日本为56.3吨/人年，苏联为52.6吨/人年。在熔炼方面，虽然冲天炉机械化已经取得了一定的进展，如很多厂已经实现了机械化配料、加料、批料自动计数和加料自动控制等，但整个熔化工部的机械化、自动化程度从全国来看仍然是很低的，发展很不平衡，相当多的工厂仍未摆脱繁重的体力劳动。因此，提高铸造生产的机械化、自动化水平是我国铸造生产发展中的重要环节。

三、采用新工艺、新技术、新设备、新材料

近年来，铸造生产在新工艺、新技术、新设备、新材料方面得到了很大的发展，铸造生产的面貌发生了较大的变化。

1. 在新工艺、新技术方面的发展 为了节约能源和提高铸件的精度，冷芯技术正在不断地发展。

壳型工艺的发展，熔模铸造是一个发展方面。而随着造型材料，如流态自硬砂、双快水泥砂、树脂砂的发展和应用，使壳型铸造的范围进一步扩大。随着化学工业的发展，树脂砂已不仅用于制芯，而且也用于造型。目前在国外，用树脂砂造型已日益广泛。

近年来，出现所谓的“物理”成型的造型方法亦引起了人们的注意，如负压造型法、冷冻造型法、磁丸造型法等。

半固态铸造是七十年代国外研制的一种新工艺，其原理与传统的全液态铸造的基本原理完全不同，这种方法更便于组织生产，是目前国外的一个重点研究项目，它有取代熔模铸造的趋势。

电液压清砂是目前较好的清理手段，在国内，近几年得到了应用和发展。它适用于各种形状和各类材质的铸件，具有清理效果好、效率高、成本低、无污染、操作简单、劳动强度低等优点。

熔炼方面，长期以来使用冲天炉。目前电热熔炼也有了发展，今后发展冲天炉-电炉双联熔炼较为理想。

在检测技术方面，国外发展很快，西欧各国已采用热分析仪和直读光谱仪。

2. 在新设备方面 人们正在不断地改进高压造型线、气动微震压实造型线，发展无箱射压造型线。

冲天炉的发展趋势之一是向大型、无炉衬发展。西欧等国都陆续将原有的小炉改为大炉，以提高其经济效益。目前世界上最大的冲天炉是日本1975年动工修建的一座熔炼量为80吨/小时的无炉衬水冷冲天炉，实际熔炼率可达100吨/小时，其最大熔化带内径为3.9米，

有效高度为15.32米，配有容量为60吨、功率为2000千瓦的工频前炉。

此外，发展冲天炉-电炉双联熔炼设备，实现熔炼过程的自动控制，也是熔炼设备的重要发展趋势。高度自动化的、大型集中的、连续熔炼式的设备，将逐步取代手工操作的、小型分散的、间断式的熔炼设备。

3. 在新材料方面 近年来，除在造型制芯材料方面有很大发展外，铸铁材质也有较大的发展，各种高强度铸铁相继出现，特别是蠕虫状石墨铸铁引起了国内外的重视，此外，我国在贝氏体球铁、锰铸铁等新材质的研究和应用方面，也有新的发展和提高。

第二章 金属学基础

金属材料的化学成分不同,其性能也不同。但在化学成分相同的条件下,若生产工艺条件不同,也会影响金属材料的性能,这是由于金属和合金的内部结构不同而导致性能差异的。

金属和合金的内部结构主要指晶体结构和显微组织。晶体结构是指原子的结合方式及其在金属和合金内部排列的形式。显微组织是指用显微镜观察放大30倍以上的金属和合金的各种组成相的不同形状、大小、数量以及它们之间的分布样式。

本章主要学习有关铸铁的各种晶体结构和显微组织,影响它们形成的外部条件和内部因素,以及组织与性能之间的关系等。了解金属和合金的结构组织以及它们变化的基本规律,对于控制和改善金属或合金的性能是有很大大意义的。

第一节 金属的晶体结构

一、基本概念

(一) 晶体与非晶体

物质通常分为晶体和非晶体两大类,二者的根本区别是原子的排列是否有规律。

1. 晶体 凡原子作有规则排列的物质称为晶体,例如冰、盐、石墨及所有的固态金属和合金等都属于晶体。

晶体的特点是:

(1) 有一定的熔化温度:例如铁的熔点为 1538°C 。这说明要想破坏晶体中原子排列的规则性,必需将其加热到一定的温度才行;

(2) 具有各向异性:指在晶体内各个方向上,具有不同的机械性能。这是由于内部晶格方位一致,因而在不同方向上原子排列密度不同、结合力不同的缘故。不过,实际金属材料都是多晶体,单个晶体的各向异性相互抵消,所以一般并不显示各向异性的特征;

(3) 具有规则的外形:每一种晶体都有自己规则的外形。

2. 非晶体 凡是原子作散乱无序堆积的物质称为非晶体,例如普通玻璃、松香、蜡烛等都属于非晶体。

非晶体具有完全不同于晶体的特点:

(1) 没有固定的熔化温度;

(2) 具有各向同性;

(3) 外形不规则。

(二) 晶格与晶胞

1. 晶格 实际晶体中的原子都是紧密地堆积在一起的,如图2-1所示。为了容易看清楚晶体中原子的不同的空间排列方式,一般用假想的线条将各原子的中心连接起来,这样就

构成了一个假想的空间格架，每个原子都位于该假想空间格子的各结点上。这种用以描绘原子在晶体中排列形式的空间格架叫做“结晶格子”，简称“晶格”，如图2-2所示。

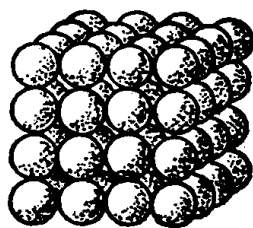


图 2-1 实际晶体中原子的排列

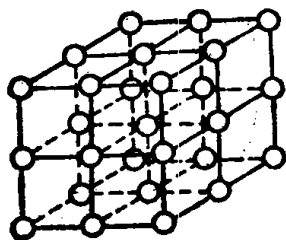


图 2-2 金属的晶格

2 晶胞 为方便起见，通常取晶格中一个能代表原子在空间排列规则的最小基本单元来描述晶体结构，这一基本单元称为“晶胞”。晶胞的形状和大小足以代表整个晶格的结构特征。

二、金属晶格的基本类型

金属中最常见的晶格有三种：体心立方晶格、面心立方晶格、密排六方晶格。

(一) 体心立方晶格

其特征是晶胞是一个正立方体，在立方体的八个角上和中心处各有一个原子，如图 2-3 所示。属于这一类型的金属有： α 铁、铬、钼、钒、钨等。

(二) 面心立方晶格

其特征是晶胞是一个正立方体，在立方体的八个顶角和立方体六个面的中心各有一个原子，如图2-4所示。属于这一类的金属有： γ 铁、铜、镍、金、银、铝等。

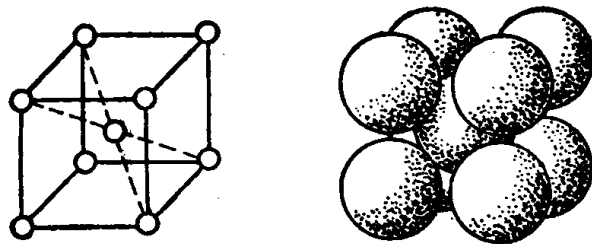


图 2-3 体心立方晶格

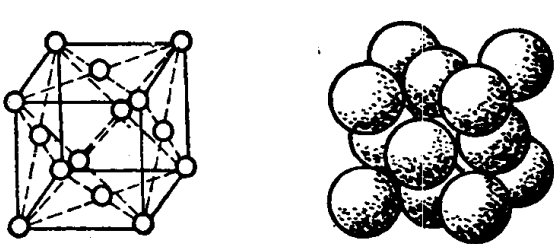


图 2-4 面心立方晶格

(三) 密排六方晶格

其特征是晶胞是一个六棱柱体，在六棱柱体的十二个角上及两个端面的中心各有一个原子，除此之外，在六棱柱体的中心还有三个匀布的原子，如图2-5所示。属于这一类的金属有：镁、钛、锌、铍等。

从上述三种晶格类型可知：不同晶格类型的原子的排列规则和紧密程度是不一样的，这就使不同金属的塑性、强度、热处理及合金化效果以及其它物理、化学性能有明显的不同。

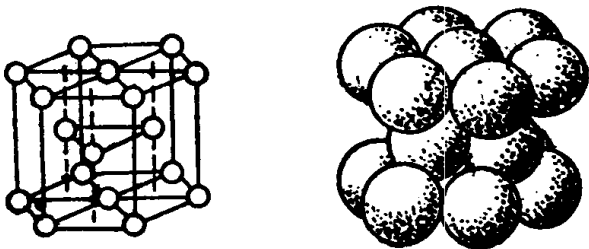


图 2-5 密排六方晶格

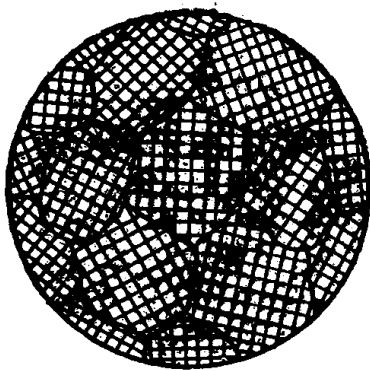


图 2-6 多晶体示意图

三、实际金属的晶体结构

实际金属都是多晶体。在显微镜下观察，工业上实际使用的金属都是由许多小晶体组成的，如图 2-6 所示。这些小晶体称为“晶粒”。每个晶粒是由许多位向相同的晶胞堆积而成的。晶粒与晶粒之间由于结晶方位的不同，便呈现出一定的交界线，这种晶粒之间的交界线称为晶界。金相显微镜看到的金属或合金的组织称为显微组织或金相组织。

第二节 金属的结晶

一、金属结晶的基本规律

(一) 结晶概念

液态金属是由许多类似晶体结构的原子小集团所组成，其原子仅在由几个或几十个原子组成的小集团内部作规则排列，并且这种近程范围内的规则排列还时刻处于忽聚忽散的动荡不定的状态中，而固态金属原子则是在几百到几千个原子范围内作规则的并带有永久性的晶格排列。因此，结晶就是金属原子由不太规则堆积的液体状态转变为作规则排列的晶体状态的过程。

(二) 金属结晶的过冷现象

各种金属由液态转变为固态是在一定的结晶温度下进行的。例如铁的结晶温度是 1538°C 。在缓慢的冷却和加热的平衡条件下，金属的结晶温度与它的熔化温度相当，这个平衡结晶温度用 T_0 来表示。

实际上，在液态金属温度下降到 T_0 时并未开始结晶，而总是要在低于 T_0 的某一温度时才开始结晶，即实际的结晶温度 T_1 比 T_0 低。这样，就会出现当温度低于熔点时，金属仍然保持液态的现象。这种现象称为过冷现象。二者之差，即 $\Delta T = T_0 - T_1$ 称为过冷度。

过冷度与冷却速度有关。冷却速度越大，则金属结晶的过冷度也越大，冷却速度越小，则过冷度也越小。在极缓慢冷却时，则 $\Delta T = 0$ ，金属完全在平衡条件下结晶。

(三) 金属结晶的条件

1. 金属结晶的能量条件 金属为什么会在一定的温度下由液态变为固态呢？结晶为什么又必须在过冷的条件下进行？这些都是由结晶的能量条件所决定的。

自然界中任何物质所处的能量状态，一般都能自发地由高能量状态向低能量状态转变。例如热量总是由高温物体自发地传至低温物体。金属结晶是否能自发进行，则要看液态和固态所处的总能量状态。

图 2-7 是液态与固态金属的自由能与温度的关系曲线。由图可以看出，两条斜率不同的曲线，在温度为 T_0 点处相交。在 T_0 处，固、液两相能量相等，此时，宏观上表现为两相处于平衡状态，结晶不能进行。当温度低于 T_0 时，固态的能量低于液态的能量，这时液

态向固态的转变过程可以自发地进行。相反，当温度高于 T_0 时，则金属由固态向液态转变的过程可以自发地进行。

由此可见，只有使液态金属过冷到平衡结晶温度 T_0 以下，才能具备结晶所需要的能量条件，这也是金属结晶时必须有过冷的基本原因。同时，从图2-7还可以看出，过冷度越大，液、固态之间的能量差值越大，固态金属越稳定，液态金属结晶成固态金属的推动力越大。

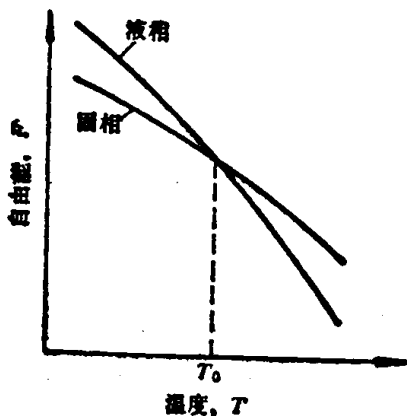


图 2-7 液、固态金属自由能与温度的关系

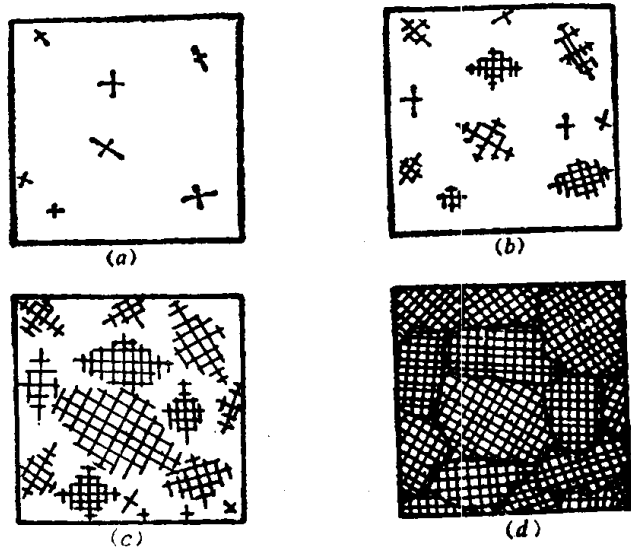


图 2-8 液态金属结晶过程示意图

2. 金属结晶的结构条件 前面已经讲过，在固态金属内，其原子是规则排列的，这种结构特征称为“远程有序”结构。而液态金属内部则仅在小范围的原子集团内呈有规则排列，这种结构特征称为“近程有序”结构。

由于液态金属中原子动能较大，原子运动很激烈，因此近程有序的原子集团很不稳定，时而长大，时而变小，时而产生，时而消失，这种现象称为结构起伏。

液态金属的温度越接近结晶温度，“近程有序”的原子集团尺寸越大，成为结晶核心的可能性也就越大。

结晶的实质，就是使具有“近程有序”结构的液体转变为具有“远程有序”结构的固体。因此这种时聚时散规则排列的小原子集团（即结构起伏），是液态金属均质形核结晶的结构条件。

（四）金属的结晶过程

1. 金属结晶的一般过程 金属的结晶过程是由以下两个基本过程组成：产生微细的晶核（简称生核）和晶核成长（简称核生长）。

一般说来，金属的结晶过程如图2-8所示：(a)为某些部位的原子集团先后按晶格类型排列成微细的晶核；(b)为各晶核沿着不同方向按树枝长大的方式结晶成长；(c)为当成长的枝晶与相邻晶体的枝晶互相接触时，彼此阻碍成长；(d)为晶体向着尚未凝固的部位长大，直到枝晶间的液体金属全部凝固为止，最后得到树枝晶架被枝晶充实的晶粒。

由分析结晶过程可以看出：金属中的每颗晶粒是由一个晶核成长形成的；晶粒外形不规则，但晶粒内部的晶格位向大体相同；各晶粒之间的晶格位向因晶核成长的方向不同而异；晶界是由不同位向的晶粒在成长时互相接触而形成的，晶界比晶粒本身凝固稍后，因

而晶界上总是容易富集低熔点的杂质。

2. 晶核的形成 晶核的形成有两种方式,即均质形核与异质形核。不依靠杂质,只依靠液态金属本身在一定过冷度的条件下形成晶核的叫做均质形核,或称自发形核。依附于液态金属中某些杂质质点而形成晶核的叫做异质形核,或称非自发形核。由于液态金属不可能绝对的纯净,其中总是或多或少地含有某些固态杂质,因此,实际金属的结晶大都是异质形核。

(1)均质形核:前面讲过,当液态金属具有一定的过冷度时,固相的自由能低于液相的能量,这时,液态金属中的某些近程有序排列的原子集团就有可能稳定下来,并扩展为有序排列。

根据热力学的观点,如果液态金属中某些规则排列的近程有序原子集团(即固相微粒),在体积变化过程中,能使体系的自由能减少,那么这个原子集团便可以自发地扩大而成为一个晶核。在什么情况下能使体系的自由能减少呢?由数学推导可知,只有当这种近程有序原子集团的尺寸大于某一临界值时才能使体系的自由能减少,从而形成晶核。这个临界值是与过冷度成反比的,即过冷度越大,近程有序原子集团形成晶核所需的临界尺寸就越小。也就是说,原来在过冷度较小时不能成为晶核的那些尺寸较小的近程有序原子集团,随着过冷度的增大,此时也可能形成晶核。因此过冷度越大,形成的晶核的数量就越多,晶粒也就越细。

(2)异质形核:异质形核的规律与均质形核基本相同,只是异质形核比均质形核要容易得多,并且在不大的过冷度下即可形核。这是因为在杂质上的形核功较小的缘故。

实际金属液体中总是存在着各种固体的杂质微粒,液态金属结晶时,往往优先依附于这些固体杂质表面形成异质晶核。在实际生产中,常常在液态金属中有意地加入一些能够促进异质形核的物质,使晶核数目大为增加,从而获得细晶粒组织。这种人为地利用异质形核以细化晶粒的方法叫做变质处理或孕育处理,所加入的用来细化晶粒的物质叫变质剂或孕育剂。例如孕育铸铁就是用硅铁作为孕育剂对铸铁进行孕育处理而得到的。

3. 晶核的生长

(1)晶核的生长方式:当液体中形成晶核以后,它的表面比较稳定,液体中的原子便能陆续地排列上去,使晶核迅速长大。晶体长大的过程就是液体中的原子向晶体表面堆砌的过程,也就是固相界面逐渐向液体内部推移的过程。

晶核长大的方式与金属固-液界面处的结构有关,即界面是粗糙还是光滑的 有关。金属的固-液界面,如以原子大小的微观尺度来衡量,则是粗糙的坎坷不平的,如图2-9所示。在这样的界面上,固相表面最外面几个原子层约有50%左右的位置未被充满,液体中的金属原子以单个或几个零星地堆砌上去是很容易的,而且在前方和侧面固相原子的作用下也比较稳定。这就是金属晶核的生长方式,晶核以这种方式连续不停地长大,且成长速度较快,这就使固-液界面均匀地迅速地向前推进。

非金属或金属性较差的固-液界面则是光滑平整的,即固相表面最外面的原子层基本上是充满的,如图2-10所示。其生长方式则是先形成一个单原子平面,然后整个原子平面同时堆砌在界面上。这种长大过程呈周期性,成长速度较慢。

(2)晶体生长的形态:金属晶核的生长形态主要取决于固-液界面前沿的液体温度分布情况。